科学読本

# 音とオーディオ(9)

平田能睦

## 7章（その2）：巧みな測定

最も簡単で設備も費用もいらない非破壊検査は，指ではじいて耳で聴くヒビ割れのチェックです．瀬戸物の茶碗のヒビは，これで100%検知できます．金槌で軽くたたいてボルトのゆるみなどを調べる非破壊検査も，耳を使います．エンジンの調子は音を聴けばわかります．ビルの壁に貼ったタイルの接着状態は打音を聴いて判断します．

科学技術の進歩した今日でも音を使った検査の多くが耳を頼りとしているのは，人の聴覚が音を分析して聴き分ける点で際立って優れているためです．

この耳に匹敵するような音や振動による非破壊検査を取り上げてみましょう．

### スピーカのビリツキ

音質のよし悪しではなく，スピーカの機能に問題がないか調べる検査がスピーカを生産する工場で行われます．音は出るかという基本的な検査から，原因はともかく，わずかなビリツキの有無まで検査します．このビリツキはFFTによる周波数分析やひずみ率の測定では検出しにくいので，訓練された耳が使われます．ほんとうは耳にはやや苛酷なビリツキ検出の仕事は，測定器を使って自動化したいところです．

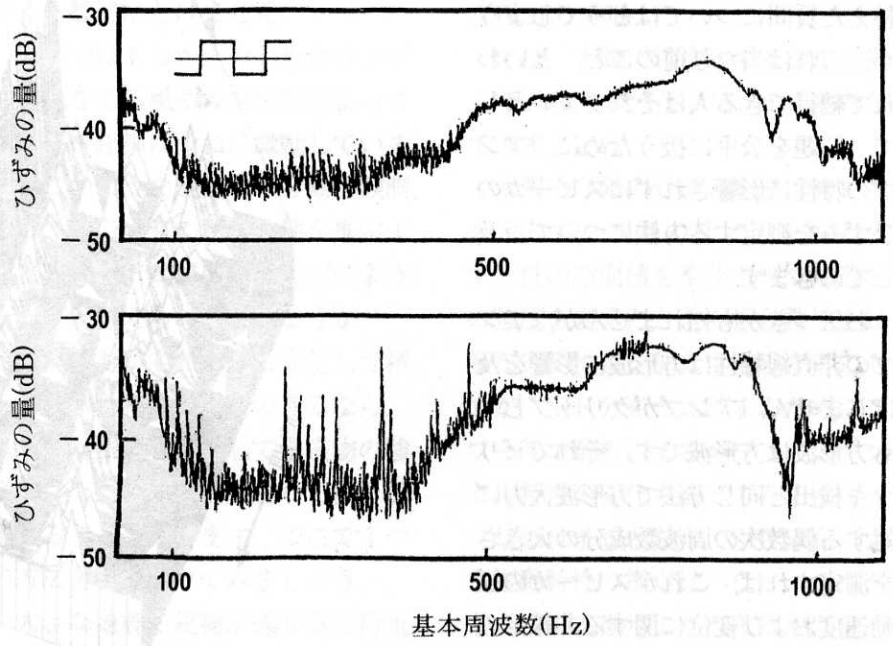
スピーカのビリツキは，制御されない振動によって生じます．このようなビリツキの有無を調べるためには，正弦波のようななめらかな波形ではなく，振動速度が急激に変化する波形が望ましく，しかも計測に適した周期波形が好ましいでしょう．

スピーカに方形波を加えると，ボイスコイルの振動速度は三角波になり，三角波の角で振動速度は急激に変化して，向きが変わります．このとき制御されない振動で発生する音を検出します．

正負対称（デューティ比50%）の方形波は，基本周波数とその奇数倍の周波数成分で構成されます．振動速度波形の三角波でも構成周波数は変わらずに，その大きさが変化するだけです．

ところが，スピーカの非直線性によって三角波がひずむと，方形波に存在しない偶数次の周波数成分も発生し，ビリツキではこれが極端になります．固有周期のあるビリツキは加えられる方形波の周期によって特定の周波数で突然大きくなります．そこで，スピーカに方形波を加えてその周期を掃引（スィープ）しつつ，偶数次の周波数成分を検出します．

さて，ビリツキのあるスピーカはどこにあるのでしょうか．前述の方法で周期を掃引しつつ偶数の周波数




〈第8・1図〉方形波を使って測定したスピーカの第2調波ひずみ．上がビリツキのないもの，下がビリツキの出たもの（音響学会講演論文1981，10月）

を検出する実験を繰り返すうちに，どうやら過大入力になってしまったようで，ビリツキを発生するようになりました．壊すつもりはまったくありませんでしたが，またとない機会というわけで，ビリツキ発生の前と後を実際に測定することができました．

ビリツキのないときにはまったくなかったスパイク波形が掃引特性に出現しましたが，これは通常のひずみとは明らかに異なります．耳を訓練すれば，わずかなビリツキでも検知することができます．入力信号は正弦波ですが，発振器のツマミを手で回し，周波数を急激に変化させてビリツキをキャッチします．耳だけでなく手も訓練します．

## スピーカの音の違いを聴き分けられるのはなぜか

「アンプの違いを聴き分けられるのはなぜか」という質問は，オーディオの根底に触れる問題でした．これは4章で取り上げたように，実験とともに納得できる説明が与えられましたが，アンプをスピーカと入れ替えた質問についてはどうでしょうか．これは当たり前のこと，といわれて納得できる人はそれでよいとして，問題を公平に扱うために，アンプの特性に影響されずにスピーカのひずみを測定する方法について言及しておきます．

お気づきかも知れませんが，アンプの非直線特性は方形波に影響を及ぼしません．アンプがクリップしても方形波は方形波です．それでビリツキ検出と同じ方法で方形波入力に対する偶数次の周波数成分の大きさを測定すれば，これがスピーカの振動速度および変位に関する非線形の度合いを表わすものになります．アンプのよし悪しには関係しません．

## 動力機の回転部のキズ

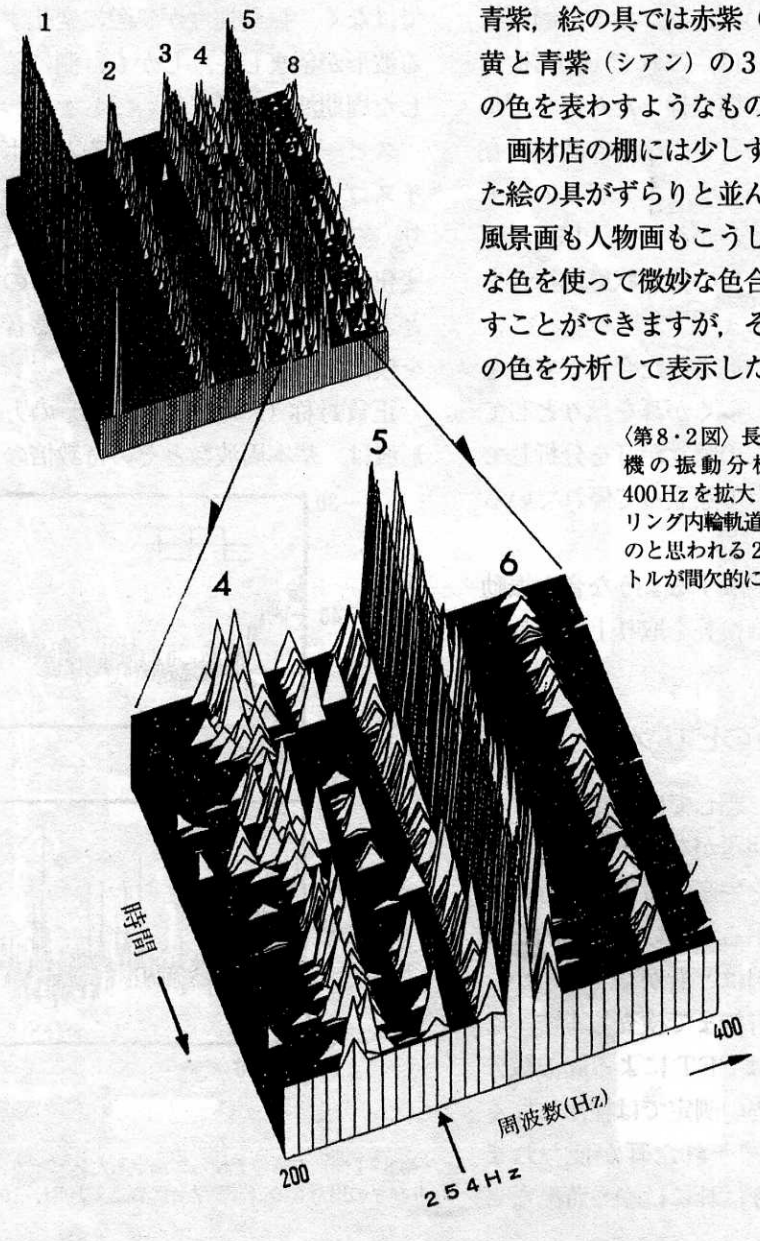
故障の原因を知ることは大切ですが，故障が発生する前にその兆しを知ることができれば，それに勝ることはありません．

そこで耐用年数を考慮して一定の稼働時間を超過したら新しいものと交換し，トラブルの発生を未然に防ぐようにしています．故障の前兆を検出できれば稼働率を上げられるだけでなく機械の保守も容易になり，経済的効果は小さくありません．

回転機の故障の代表的なものはボール・ベアリングや軸受などの力の加わる部分に生じる傷です．傷が音で聴き取れる段階になったのでは危険ですが，それでも検知されないよりはマシです．しかし，このような段階の音を周波数分析しても，分析結果から異常があると判断できることはほとんどありません．人間の耳が非常によいというよりも，むしろ周波数分析の精度がそれほど高くないという方が正しいでしょう．

FFTで代表されるフーリエ変換は，取りこぼしなく周波数帯域をカバーする必要最小限の数の周波数で波形を表わすもので，これを調和解析（分析）といい，その周波数を調和周波数といいます．色に例えれば調和解析は3原色，光では赤と緑と青紫，絵の具では赤紫（マゼンタ）と黄と青紫（シアン）の3色ですべての色を表わすようなものです．

画材店の棚には少しずつ色の違った絵の具がずらりと並んでいます．風景画も人物画もこうしたさまざまな色を使って微妙な色合いを作り出すことができますが，そのような絵の色を分析して表示したとすると，




〈第8・2図〉長年使用した電動機の振動分析結果．200～400Hzを拡大した図にはベアリング内輪軌道の変質によるものと思われる254Hzのスペクトルが間欠的に現われている

それを3原色の配合率で示すよりも絵の具の色（名称）で明示する方がずっとわかりやすいでしょう．

一般調和解析と呼ばれる周波数分析では，ずらりと並んだ絵の具の3原色以外の色で例えられる非調和周波数も使って波形を表わします．これにより茶は茶，紫は紫と表わすように，含まれた周波数成分はそのまま分析結果に出て来ます．回転音の分析ではこれが特に重要です．

火力発電所で30年近く使われた冷却用ファン電動機（出力2.2kW，2極，定路回転数3640rpm），聴いてわかる回転音の異常なし，FFTによる振動分析の結果も問題なし，ということですが，ほんとうに何も異常はないのでしょうか．電動機の振動データを入手できたので，これを非調和フーリエ解析を使って，周波数分析してみました．

時間によって変化する振動スペクトルを観察するために，約70秒間の振動データを64ミリ秒の長さに細かく分割して，その1つ1つを分析してスペクトルを求め，これを時間の順に配列すると，周波数，振幅，時間の3軸方向へ立体的に現わした振動の時間変動スペクトルが得られます．

電動機の回転周波数は57.7Hzで，その整数倍の周波数のところにスペクトルが現われていますが，わずかな回転の変動によるスペクトルの周波数ゆらぎが見えます．

電動機の回転部に傷のような変化が生じると，その個所で決まる周波数成分が発生します．この電動機の場合，ベアリング内輪軌道に傷がついたときに発生する周波数は254Hz，外輪軌道に傷がついたときに発生する周波数は151Hzです．内輪周波数に相当するところに間欠的に生じている周波数成分が見えます．この周波数成分は近傍の成分よりも10dB以上小さいので，耳では聴き取ることができないでしょう．この時点で内輪軌道に目に見える傷はありません．

しかし，材料表面の内側に材質的な変化が生じているようです．この変化部分がフレーキング（剥れ落ち）となるまでどれほど時間がかかるかはわかりませんが，よいときに電動機が交換されたことはわかります．

## 建造物の損傷

結果から原因を推定する問題を逆問題といいます．地球物理学では地震動から断層運動や地球内部の構造を推定する逆問題があります．身近なところでは，スイカを指ではじいて熟し具合を耳で調べる逆問題があります．感覚に頼るものは別として，逆問題では解析手法の工夫がとても重要です．

ブラインド問題は逆問題の特殊なもので，未知の入力を加えられたブラックボックス（未知の系）の出力信号から入力信号あるいはブラックボックスの特性を推定する問題ですが，一般にはとけません．

未知ではあるが，おおむねランダムと見なせる風や地盤振動によって橋や搭や建物はつねに微動しています．このような建造物の振動を観測して，その固有の振動特性を推定するブラインド問題に対してどのような解法が考えられるでしょうか．

多少外力が変わっても安定して精度よく振動特性を推定できるなら，風や地盤振動を利用して建造物の強度変化を監視する画期的な方法を提供することができます．ここで1つの方法を取り上げてみましょう．

大きな地震で建物が繰り返し荷重を受けると，剛性は低下し内部損失は増加します．こうして強度変化が生じると，建物の振動特性もかならず変化します．巨大な加振機を使って地盤を振動させれば建物の固有周期や共振鋭度を調べることができますが，地震のたびにこうした測定を行ない，強度変化を調べるのは現実的でないばかりか，大きな建物は振動させること自体困難です．

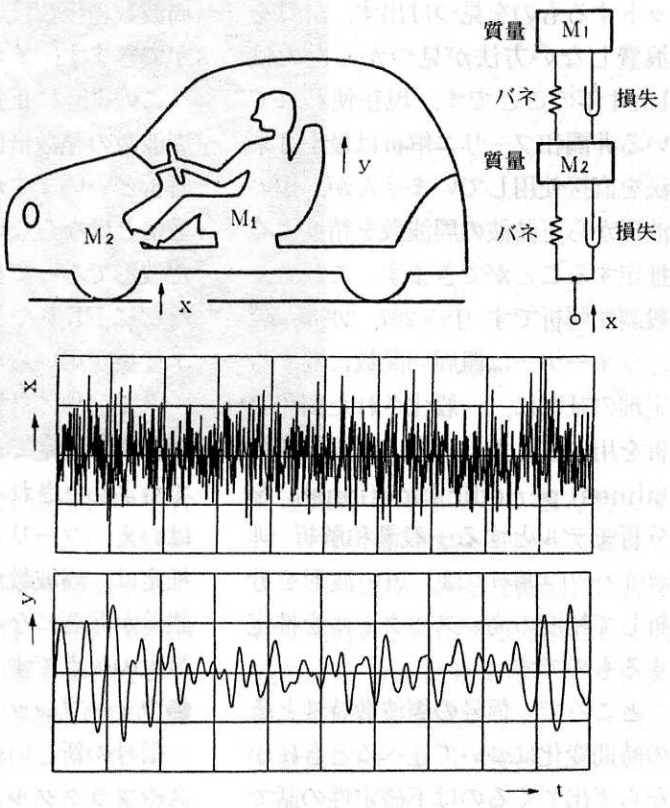
風や地盤の振動波形がどのようなものか，どの時刻にどの方向から建物に力が加わるかわかりませんが，その振動力の周期が建物の固有周期に近いほど建物はよく揺れます．振動は時々刻々変化するので，その振動波形を短く区切り，その区間ごとに波形を代表する周期「短区間周期（SIP：Short Interval Periods）」を求め，どの周期がどれほどの頻度で検出されるか，SIPの分布を描いてみます．

このSIP分布のサンプルとなる周期を検出するためには，精度の高い周波数分析法である非調和フーリエ解析が必要ですが，雑多な入力振動で生じる出力振動波形を観察するだけで，ブラックボックスの振動特性がSIP分布に現われてきます（JSV313,2008）．

では，実際に建造物のモデルを造って強度変化をSIP分布で検出してみましょう．

木製の3階の骨組みを建造物モデルとして，四隅の柱に手を加えます．柱の断面積を変化させて建造物の強度を変えたときの振動特性を雑多な連続振動を加えて推定するのですが，SIP分布と比較するために，フーリエ解析によるパワー・スペクトル特性の変化も調べてみます．

結果は予想どおり，SIP分布による振動特性の推定はパワー・スペクトルによる推定よりもはるかに安定しており，この新しい方法を使って実際に建物などの強度変化を検出で




〈第8・6図〉
路面の凹凸による車の振動xで生じる運動席の振動yを求める

フィルタのインパルス応答に相当する小波を移動して波形とかけ合わせる演算で行ないます．アナログ方式の最先端の分析装置として音響分野で使われたリアルタイム・アナライザ（バンドパス・フィルタを多数並列に配置した装置）とふさわしい出力装置があれば，これで連続ウェーブレット変換の準備は完了です．

**●数値実験**

実物は使わずに実物の特性を表すモデルを使って行なう実験を模擬実験（シミュレーション）といい，このモデルを数式で表わしてコンピュータによる計算で行なう実験を数値シミュレーションといいます．いまでは土木，建築，航空，船舶，自動車そして気象などの広い分野で，膨大な量の計算を必要とする数値シミュレーションが大型コンピュータを用いて行なわれています．

こうした大規模な数値シミュレーションの他にパソコンなどを用いた数値実験があります．たとえば，走行する車が路面から受ける振動をx，座席での振動をyとし，これを複数の質量とバネで構成される振動モデルで表わし，このモデルを数式で記述すれば，任意の振動xに対する振動yの波形を数値の計算で求めることができます．

頭の中にある装置を理論的に記述することができれば，実際に装置を作らなくても数値実験によってその動作を調べることができます．

**●最小2乗法**

フランス人の数学者ルジャンドル/A. M. Legendre（1752～1833）は，1805年に出版した小冊子「彗星軌道の決定のための新方法」の中で最小2乗法について，「それは誤差の平方の和を最小ならしめること」と述べて，「一般的で，正確で，応用しやすく」，「いちばん真の値に近い…状態を示すのに，非常によく適している」と，簡単かつ明瞭な原理の説明をしています．

しかし，話はこれで終わりませんでした．ドイツ人の数学者ガスウは「1795年以来，われわれが使って来た原理は，最近ルジャンドル氏により…という著作の中で発表された」，と彼の著書（1809年）の中で述べ，以後繰り返し執拗に自分の先取権を主張しています（「最小2乗法の歴史」安藤洋美）．「発表はしなかったが，自分も同じことをやっていた」と主張するのは，天才には似つかわしいことではありませんが，ガウスの人となりの一面を表わしているのでしょう．

**●不確定性**

バンドパス・フィルタのインパルス応答の長さと帯域幅，ウェーブレット変換のウェーブレットの長さとその周波数成分の帯域幅，これらの間にはいずれも一定の関係があり，波形の長さを$\Delta t$，周波数帯域幅を$\Delta f$とすると，$\Delta t \Delta f \approx 1$となります．帯域幅を狭くすれば波形は長くなり，波形を短くすれば帯域幅は拡がります．こちらを立てればあちらが立たずで，$\Delta t$と$\Delta f$を同時に小さくすることはできません．時間と周波数に関するこの不確定性は孤立波の測定においては避けることのできない原理的な制約です．物理学の分野では，ハイゼンベルクの不確定性原理として知られています．

連続波形の正弦波のある区間を取り出してフーリエ変換すると，区間の長さと変換によって得られた周波数特性の帯域幅の間には不確定性の関係が見られますが，これは周波数分析一般に当てはまる原理的な制約を示すものではなく，分析法から生じる制約です．フーリエ変換は分析区間の波形を孤立波（前後を0とする無限積分の場合），もしくはその周期的な繰り返しの1区間と見なします．一方，非調和フーリエ解析では，分析区間の波形の前後に波形がなめらかに無限に続くものと仮定します．